



УДК 532.54, (621.6 + 620.9)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОСЕТИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ

А.В. Еремин, С.В. Колесников, И.В. Кудинов,
А.Н. Бранфилева, Л.С. Абишева

Самарский государственный технический университет
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2614-6329>, a.v.eremin@list.ru, totig@yandex.ru

Резюме: Приведены результаты разработки математической и компьютерной модели тепловой сети централизованного теплоснабжения г. Самара, запитываемой от трех тепловых источников: Самарская ГРЭС (СГРЭС), Центральная и Привокзальная отопительные котельные (ЦОК и ПОК). В её основе лежит электрогидравлическая аналогия распространения тока в проводниках и жидкости в трубах, которые описываются одинаковыми уравнениями. И, в частности, законы Кирхгофа, применяемые в расчётах электрических цепей, ввиду электрогидравлической аналогии могут быть применены при расчётах различного вида трубопроводных систем, включая и тепловые сети. С целью максимального приближения модели к реальной сети по оказываемому ею гидравлическому сопротивлению применён метод автоматической идентификации модели, который представляет итерационный процесс изменения сопротивления трубопроводов таким образом, чтобы получаемые на модели результаты совпадали с экспериментальными данными. В зависимости от количества точек с известными экспериментальными данными точность идентификации составляет 3 – 5%. Исследования, выполненные на модели, позволили разработать планы объединения теплоисточников и их оптимальной реконструкции. Полученные результаты могут быть использованы при построении компьютерных моделей теплосетей больших городов, теплосетей и циркуляционных систем тепловых электрических станций, а также любых других многокольцевых разветвлённых трубопроводных систем.

Ключевые слова: сложные многокольцевые трубопроводные системы, электрогидравлическая аналогия, математическая и компьютерная модель, автоматическая идентификация модели, законы Кирхгофа.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВО «СамГТУ» (код проекта: 1.5551.2017/БЧ).

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODEL OF HEATING NETWORK BASED ON THE ELECTRONIC-HYDRAULIC ANALOGY

A.V. Eremin, S.V. Kolesnikov, I.V. Kudinov,
A.N. Branfileva, L.S. Abisheva

Samara State Technical University, Samara, Russia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2614-6329>, a.v.eremin@list.ru, totig@yandex.ru

Abstract: This article presents the results of development of mathematical and computer model of heating network for the city of Samara. The heating network includes three heat sources:

Samara State Regional Power Plant, «Centralnaya» and «Privokzalnaya» heating boilers. The model development is based on the electronic – hydraulic analogy. In particular, Kirchhoff's laws were used. In order to approximate the model to the real network, the method of automatic identification of the model was applied. Depending on the number of points with known experimental data, the accuracy of identification was 3 - 5%. The research allowed developing plans for an optimal reconstruction of heating network. The obtained results can be used for designing heating systems of big cities, heating systems and circulating systems of thermal power plants, as well as for any other multi – ring branched pipeline systems.

Keywords: complex multi – ring pipeline systems, electronic – hydraulic analogy, mathematical and computer models, automatic model identification, Kirchhoff's laws.

Acknowledgments: The study was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the baseline part of the State Assignment of Samara State Technical University (project No. 1.5551.2017/БЧ).

Введение

Математическое и компьютерное моделирование процессов переноса тепла, массы и импульса широко применяется в промышленности. Известные математические модели указанных процессов крайне сложны и, несмотря на упрощающие допущения, не могут быть исследованы с помощью точных аналитических методов. В этой связи весьма перспективным представляется применение метода аналогии, когда исследование каких-либо процессов выполняется на объектах совсем другой природы, но описываемых одинаковыми уравнениями. Например, два закона Кирхгофа, применяемые в расчетах электрических сетей, могут быть использованы для определения скоростей и давлений движущихся жидкостей вследствие аналогии электрических и гидравлических явлений.

Математические модели движения жидкости в трубах включают соответствующие дифференциальные уравнения переноса, которые, как правило, нелинейны, и поэтому их решение затруднительно как с помощью аналитических, так и численных методов. Поэтому основанная на электрогидравлической аналогии теория гидравлических систем представляется эффективной альтернативой процессу непосредственного математического моделирования. Разработке этой теории посвящены работы Сухарева М.Г., Меренкова А.П., Хасилева В.Я., Коваленко А.Г., Соколова Е.Я. и др. [1 – 15], в которых даны основные положения построения математических и компьютерных моделей. В основу теории гидравлических систем положен метод расчёта расхода на различных участках сети. И, в частности, в работе [4] приводятся данные по использованию для этих целей законов Кирхгофа. В этой работе также показано, что применение данного метода к расчёту многокольцевых трубопроводных сетей связано с большим объёмом вычислений. Для преодоления указанных трудностей в настоящей работе применяются алгоритмы, основанные на итеративных методах расчёта увязочных расходов [1, 3, 4, 6, 8, 10].

Теоретические основы

Идею метода рассмотрим на примере нахождения расходов в сети, включающей одно кольцо с тремя ответвлениями (рис.1). Расходы по ответвлениям Q_1 , Q_2 , Q_3 заданы, а их сумма равна расходу Q на входе в кольцо. Необходимо найти расходы Q_a , Q_b , Q_c , Q_d по участкам a , b , c , d кольца.

Первый и второй законы Кирхгофа устанавливают равенство притока и оттока среды в любом узле:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0$$

и равенство нулю суммы напоров для любого замкнутого контура:

$$\sum_{i=1}^n H_i = \sum_{i=1}^n S_i Q_i^2 = 0,$$

где S_i , Q_i , ($i = \overline{1, n}$) – гидравлическое сопротивление и расход на i -м участке; n – число трубопроводов, соединяющихся в узле (для первого закона Кирхгофа) и содержащихся в замкнутом контуре (для второго закона Кирхгофа). На основе этих соотношений путём итеративного метода расчёта по заданным расходам на входе в кольцо и по его ответвлениям находятся расходы на участках. На первом шаге итерации на участках кольца задаются произвольные расходы. Следовательно, по первому закону Кирхгофа

$$Q_d = Q - Q_a; \quad Q_a = Q_1 + Q_b; \quad Q_b = Q_2 + Q_c.$$

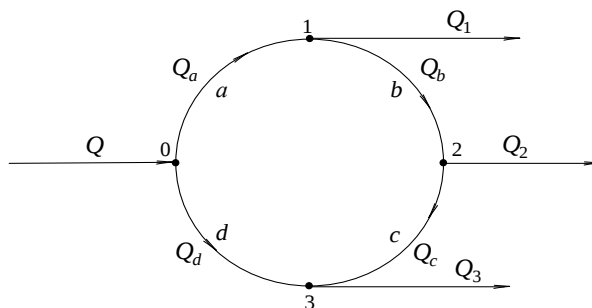


Рис. 1. Расчетная схема модели

Согласно второму закону Кирхгофа

$$\delta H = \sum_{i=1}^4 S_i Q_i^2 = S_a Q_a^2 + S_b Q_b^2 + S_c Q_c^2 - S_d Q_d^2.$$

Увязочный расход можно найти из последнего соотношения, положив $\delta H = 0$. Тогда, пренебрегая членами $(\delta Q)^2$, как относительно малыми, с учетом произвольно принятых на первом шаге итерации расходов по участкам сети находим

$$\delta Q = \delta H / \left(2 \sum_{i=1}^n S_i Q_i \right), \quad (1)$$

где $\sum_{i=1}^n S_i Q_i = S_a Q_a + S_b Q_b + S_c Q_c + S_d Q_d$.

После нахождения на первом шаге итерации δQ по формуле (1) расходы по участкам кольца уточняются с повторением расчёта. Итерации продолжаются до отличия двух последних расходов на заданную величину.

Применение данного метода для расчёта расходов в многокольцевой гидравлической сети возможно лишь при использовании современной компьютерной техники. Компьютерная модель строится на основе теории графов [16, 17], исходя из которой создается «дерево» теплосети (рис. 2). На рис. 2 цифрами 1, 2, 3, ..., 9 обозначены вершины,

а буквами $a, б, в, \dots$ – дуги. Вершинами графа являются точки соединения трубопроводов, а дугами – их участки. «Дерево» теплосети строится таким образом, что из вершины 1 можно достичь любой другой из имеющихся вершины.

Отметим, что при использовании теории графов выполняется условие неразрывности потока. При выполнении расчетов любая вершина отмечается номером, высотой расположения, величиной притока или оттока среды и др. Дуги имеют номер, длину и диаметр труб, коэффициент трения и другие параметры.

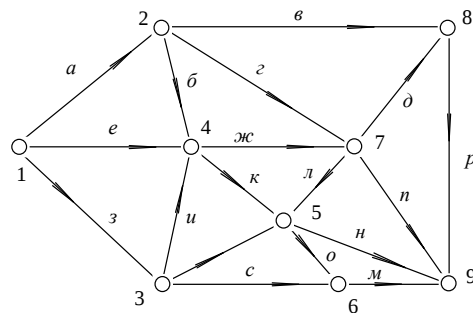


Рис. 2. Схема графа

Вследствие итеративного метода расчёта для сложных сетей возникает проблема сходимости итераций. На практике ввиду быстрой сходимости итераций применяется способ поконтурной увязки перепада давлений [1 – 3, 4, 6, 8, 10, 11].

Рассчитываемая теплосеть может включать следующие элементы: узлы и участки тепловой сети; насосные станции; напорно-регулирующие емкости; задвижки (в открытом или закрытом состоянии); теплообменники и проч. Узлы бывают: с заданным напором; с заданной подачей (теплоноситель поступает в сеть – отрицательный расход); с заданным отбором (теплоноситель забирается из сети – положительный расход); промежуточные (отбор теплоносителя в узле отсутствует).

Узлы с заданным напором рассматриваются как напорные и регулирующие емкости. Расчетными для них являются величина подачи воды в сеть (расход со знаком минус) или величина поступления воды из сети (положительный расход). Узлы с заданной подачей или отбором могут иметь любую интерпретацию (емкость, насосная станция, водопотребитель и др.). В частности, если расход равен нулю, то это промежуточный узел – для этих узлов расчетным является напор. Все участки подразделяются на участки-трубы, участки-насосы, участки-задвижки и теплообменники.

При построении компьютерной модели теплосети необходимо находить гидравлические характеристики (зависимости потерь напора от расхода) всех её участков. Рассмотрим построение гидравлических характеристик трубопроводов. Потери напора в трубопроводе включают линейные потери и потери в местных сопротивлениях:

$$\Delta h = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} + \sum \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (2)$$

где Δh – потери напора, м; λ – коэффициент трения; l – длина трубопровода, м; d – внутренний диаметр, м; v – средняя скорость, м/с; $\sum \xi$ – сумма коэффициентов местных потерь на участке; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Вводя эквивалентную длину, потери в местных сопротивлениях приводятся к линейным с расчётом эквивалентной длины местных сопротивлений по соотношению $l_3 = d \sum \xi / \lambda$. Тогда формула (2) примет вид

$$\Delta h = \frac{v^2}{2g} \left(\lambda \frac{l}{d} + \lambda \frac{l_3}{d} \right) = \frac{\lambda v^2}{2dg} (l + l_3).$$

Учитывая, что по известному расходу жидкости Q скорость определяется по формуле $v = 4Q/(\pi d^2)$, находим

$$\Delta h = \frac{8\lambda(l + l_3)}{\pi^2 g d^5} Q^2.$$

Отсюда для участка-трубы гидравлическая характеристика будет $\Delta h = sQ^2$, где $s = 8\lambda(l + l_3)/(\pi^2 g d^5)$ – гидравлическое сопротивление участка, c^2/m^5 .

Для каждого участка-трубы вводятся: диаметр; длина; коэффициенты местных сопротивлений. Для участка-задвижки гидравлическая характеристика будет $\Delta h = sQ^2$, где s – коэффициент (для полностью открытой задвижки принимаемый равным 0,07).

Участки-насосы в модели представлены зависимостями, связывающими напор насоса и его подачу. Характеристика насоса определяется формулой $H = H_\phi - Q_n^m S_\phi$, где H_ϕ – напор при закрытой на выходе задвижке $Q_n = 0$, м; Q_n – подача насоса, m^3/c ; S_ϕ – гидравлическое сопротивление насоса, $кг/м^3$. Значение m принимается равным 2 или 1,85, в соответствии с характеристикой насоса. Величины H_ϕ и S_ϕ находятся по двум произвольным точкам паспортной характеристики насоса при использовании соотношений:

$$S_\phi = \frac{H_a - H_b}{Q_a^2 - Q_b^2}; H_\phi = H_a - S_\phi Q_a^2,$$

где индексы «а» и «б» обозначают параметры H и Q , определяемые из паспортных данных.

Результаты

Приведенный выше алгоритм позволяет построить модель с паспортными характеристиками. Однако характеристики реальной сети могут значительно отличаться от паспортных. Для того, чтобы максимально приблизить компьютерную модель к реальной сети, выполняется её идентификация [1–3]. Для этой цели используются экспериментальные данные по давлениям в некоторых точках сети. Для приближения компьютерной модели к реальной сети гидравлические сопротивления её участков изменяют так, чтобы получаемые на модели давления как можно меньше отличались от экспериментальных их величин. Процесс идентификации – итеративный. Его точность определяется количеством точек, в которых известны экспериментальные данные.

Теплосети всех перечисленных источников теплоты (ЦОК, ПОК, СГРЭС) на местности разделены закрытыми задвижками. Открытие какой-либо из них внесёт существенный дисбаланс в работу объединенных таким образом теплосетей, в которой конкретное распределение параметров может быть найдено лишь экспериментальным методом. Однако имея модели от всех перечисленных источников, их можно объединить в единую компьютерную модель, на которой можно рассчитать различные варианты её работы с целью определения наиболее оптимальных из них (рис. 3). На схеме рис. 3 приведены эпюры давлений для режима работы в раздельном варианте (задвижки 27 – 30, 41 – 48 закрыты). Путём открытия отдельных из этих задвижек на объединённой компьютерной модели выполнено исследование различных вариантов работы тепловой сети. Найденные результаты позволяют заключить, что, исходя из условий удобства месторасположения теплоисточников, весьма рациональным и эффективным может быть следующее направление перераспределения нагрузки. Как следует из эпюр давления, в наиболее неблагоприятных условиях находятся потребители от Привокзальной отопительной котельной (нагрузка 7400 т/ч). И, в частности, у большей части потребителей

наблюдаются недостаточные перепады давления между прямой и обратной магистралями (менее 2 кгс/см^2 – паспортное значение 2 кгс/см^2), а также повышенные давления в обратных магистралях (более 6 кгс/см^2 при предельно допустимом – 6 кгс/см^2). Все эти проблемы возникают ввиду недостаточной пропускной способности трубопроводов из-за их малого диаметра, в связи с чем была бы весьма целесообразной передача нагрузки от ПОК теплосети от ЦОК (общая нагрузка 5032 т/ч) и теплосети от СГРЭС (общая нагрузка 5700 т/ч).

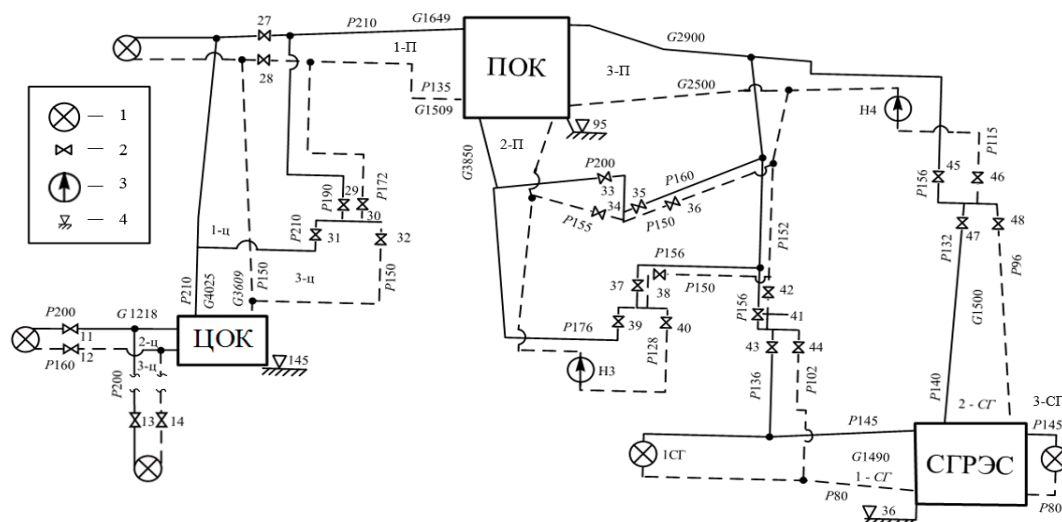


Рис. 3. Распределение давлений в теплосети централизованного теплоснабжения г. Самары: 1 – потребители теплоты; 2 – задвижки; 3 – понизительные насосные станции; 4 – отметка высоты, м; P – давление, м вод. ст.; G – расход теплоносителя, т/ч. 1-Ц, 2-Ц, 1-П, 2-П, 3-П, 1-СГ, 2-СГ, 3-СГ – тепловыводы соответственно ЦОК, ПОК, СГРЭС

В результате осуществления указанных перегруппировок нагрузки, ввиду уменьшения затрат энергии на перемещение среды, появляются новые возможности по принятию дополнительной нагрузки без строительства новых участков теплосетей. При этом можно так улучшить режим работы теплосети, что не будет необходимости использования понизительных насосных НЗ, Н4 (второй и третий выводы ПОК) (см. рис. 3), а также можно будет снизить затраты энергии на доставку теплоносителя потребителям за счёт уменьшения длины пути.

В частности, были выполнены расчеты, связанные с передачей нагрузки от второго вывода ПОК (рис. 4) к первому выводу СГРЭС (рис. 5) в количестве 900 т/ч. Эпюры давления на соответствующих выводах до передачи нагрузки приведены на рис. 6, 7 и после передачи – на рис. 8, 9. Анализ полученных результатов позволяет заключить, что недостаточный располагаемый перепад давления на втором выводе ПОК (составляющий менее 5 м вод. ст.) после передачи нагрузки возрастает до величины 22 м вод. ст., превышающей минимальную величину паспортного давления. Уменьшение располагаемого перепада давления между прямым и обратным трубопроводами первого вывода СГРЭС с 42 до 23 м вод. ст. не выходит за пределы допустимых величин.

При выполнении идентификации модели проведено исследование двух вариантов, отличающихся числом точек, в которых были известны экспериментальные данные по давлениям. Так, при общем числе узлов теплосети от ПОК равном 180, при использовании экспериментальных данных, известных в 45 точках (расположенных равномерно в пределах сети), точность идентификации находится в пределах 5%. При числе экспериментальных точек равном 60 точность идентификации возрастает до 3%. Однако при этом существенно

возрастает объем вычислительной работы, выполняемой компьютером в процессе итеративного поиска таких сопротивлений трубопроводов, при которых напоры, получаемые из расчетов на модели, отличаются от экспериментальных их значений на заданную величину. После достижения требуемой точности работа компьютера прекращается.

Возможность принятия дополнительной нагрузки в количестве 450 т/ч появляется на первом выводе ПОК после передачи с этого вывода такого же количества нагрузки на существенно недогруженный третий вывод ЦОК.

С целью повышения располагаемого перепада давлений на втором выводе ПОК рекомендуется на с L участке от 250 до 950 м выполнить реконструкцию трубопроводов с увеличением диаметров с существующих 800 до 1000. Данное мероприятие приведет к увеличению располагаемого перепада давлений примерно на 20 м вод. ст.

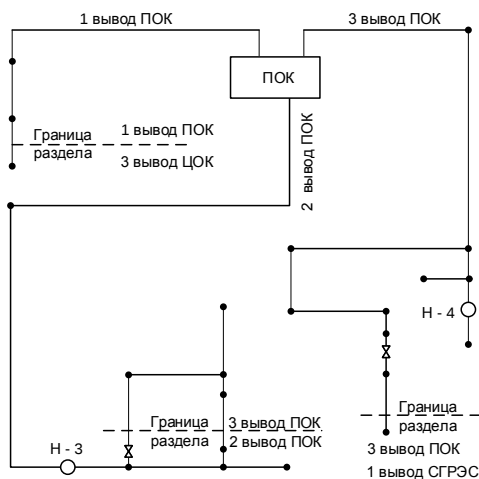


Рис. 4. Схема теплосетей от ПОК (1, 2 и 3 тепловыводы)

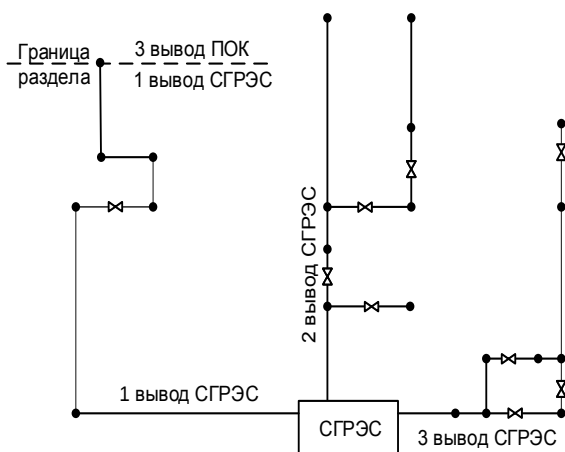


Рис. 5. Схема теплосетей от СГРЭС (1, 2 и 3 тепловыводы)

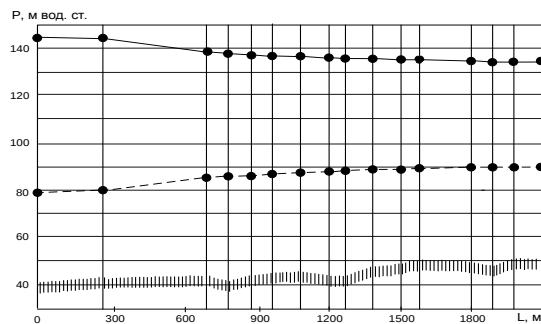


Рис. 6. Распределение давлений на первом выводе СГРЭС до принятия нагрузки от 3 вывода ПОК: P , м вод. ст. – давление; L – длина трубопроводов; ||||| – отметка высоты на местности; ● – тепловые камеры, в которых задан расход теплоносителя потребителям теплоты; ——— – прямой трубопровод; - - - - - обратный трубопровод

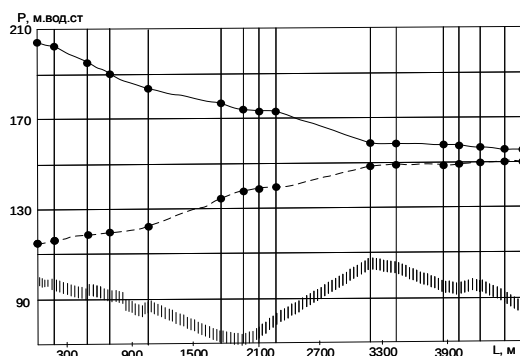


Рис. 7. Распределение давления на третьем выводе ПОК до передачи нагрузки на первый вывод СГРЭС

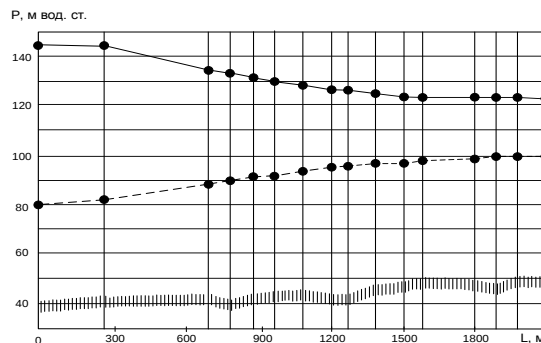


Рис. 8. Распределение давлений на первом выводе СГРЭС после принятия нагрузки от 3 вывода ПОК

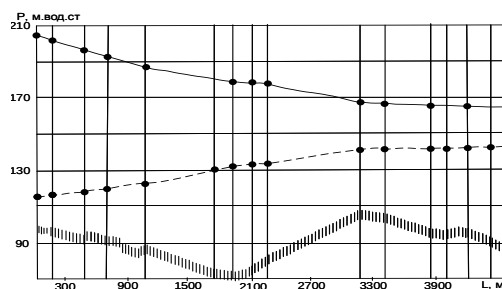


Рис. 9. Распределение давления на третьем выводе ПКО после передачи нагрузки на первый вывод СГРЭС

Выводы

1. На основе электрогидравлической аналогии разработана математическая и компьютерная модель объединённой теплосети централизованного теплоснабжения г. Самара, запитываемой от следующих источников теплоты: Самарская ГРЭС, Привокзальная и Центральная отопительные котельные. Модель позволяет выполнять расчёты давлений, расходов, потерь напора, затрат электроэнергии на привод насосов и проч.

2. Для более точного приближения модели к реальной сети выполняется метод автоматической идентификации, связанный с изменением сопротивлений некоторых участков теплосети таким образом, чтобы получаемые на модели параметры как можно меньше отличались от экспериментальных данных. Точность идентификации в зависимости от используемого числа экспериментальных точек составляет 3 – 5 %.

3. Выполненные исследования позволили найти те участки теплосети, на которых для повышения расхода следует выполнить реконструкцию с целью увеличения диаметров трубопроводов. Были также проведены исследования, позволяющие определить возможности принятия дополнительной нагрузки. И, в частности, передача нагрузки в количестве 450 т/ч с первого вывода ПКО на недогруженный 3-ий вывод ЦОК позволяет на первом выводе ПКО принять аналогичное количество дополнительной перспективной нагрузки.

Литература

1. Коваленко А.Г., Туева К.С. Система синтеза и анализа гидравлических сетей. Вычислительный Центр АН СССР, 1989. 70 с.
2. Кудинов В.А., Коваленко А.Г., Колесников С.В., Панамарев Ю.С. Разработка компьютерной модели и исследование работы циркуляционной системы Новокуйбышевской ТЭЦ-2 // Изв. АН. Энергетика. 2001. №6. С. 118 – 124.
3. Зройчиков Н.А., Кудинов В.А., Коваленко А.Г., Колесников и др. Разработка компьютерной модели и расчет оптимальных режимов работы циркуляционной системы ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго» // Теплоэнергетика. 2007. № 12. С. 7 – 15.
4. Кудинов И.В., Колесников С.В., Еремин А.В., Бранфилева А.Н. Компьютерные модели сложных многокольцевых разветвленных трубопроводных систем // Теплоэнергетика. 2013. №11. С. 64 – 69.
5. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Энергоиздат, 1982. 360 с.
6. Колесников С.В., Дикоп В.В., Томкин С.В., Кудинов В.А. Исследование гидравлических режимов работы циркуляционной системы Тольяттинской ТЭЦ на компьютерной модели // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2002. №6.
7. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985. 278 с.
8. Колесников С.В. Исследование Тольяттинских тепловых сетей на компьютерной модели // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия технические науки. 2014. №2 (42). С. 136 – 147.

9 Меренков А.П. Дифференциация методов расчета гидравлических сетей // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1973. Т. 13. №5. С. 1237 – 1248.

10. Устройство для обратного водоснабжения электростанций с градирнями. Пат. 2236517 RU. Дикоп В.В., Алфеев А.А., Кудинов В.А., Кудинов А.А., Исаев А.Е; заявл. 26.02.2002; опубл. 20.09.2004. Бюл. № 26.

11. Меренков А.П. Применение ЭВМ для оптимизации разветвленных тепловых сетей // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1963. №4. С. 531 – 538.

12. Меренков А.П и др. Применение теории и методов расчета гидравлических цепей к системам с неизотермическим течением газа // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1971. №6. С. 129 – 138.

13. Сухарев М.Г. Об одном методе расчета газосборных сетей на вычислительных машинах // Изв. вузов. Нефть и газ. 1965. №6. С. 48 – 52.

14. Колесников С.В., Кудинов И.В., Еремин А.В., Колесникова А.С., Бранфилева А.Н. Исследование гидравлических режимов работы циркуляционных систем ТЭЦ на компьютерных моделях // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 7-8. С. 112–122.

15. Сумароков С.В. Математическое моделирование систем водоснабжения. Новосибирск: Наука, 1983. 167 с.

16. Сумароков С.В. Метод решения многоэкстремальной сетевой задачи // Экономика и математические методы. 1976. Т. 12. №5. С. 1016 – 1018.

17. Зыков А.А. Теория конечных графов. М.: Наука. СО. 1969. 543 с.

Авторы публикации

Еремин Антон Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» (ТОТиГ) Самарского государственного технического университета (СамГТУ). E-mail: a.v.eremin@list.ru.

Колесников Сергей Владимирович – канд. техн. наук, докторант кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» (ТОТиГ) Самарского государственного технического университета (СамГТУ). E-mail: totig@yandex.ru.

Кудинов Игорь Васильевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» (ТОТиГ) Самарского государственного технического университета (СамГТУ). E-mail: igor-kudinov@bk.ru.

Бранфилева Анастасия Николаевна – канд. техн. наук, ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» (ТОТиГ) Самарского государственного технического университета (СамГТУ). E-mail: totig@yandex.ru.

Абишева Любовь Сергеевна – аспирант кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» (ТОТиГ) Самарского государственного технического университета (СамГТУ). E-mail: totig@yandex.ru.

References

1. Kovalenko A.G., Tueva K.S. Sistema sinteza i analiza gidravlicheskih setej. Vychislitelnyj Centr AN USSR. 1989. 70 p. (in Russian)

2. Kudinov V.A., Kovalenko A.G., Kolesnikov S.V., Panamarev U.S. Razrabotka kompyuternoj modeli i issledovanie raboty cirkulyacionnoj sistemy Novokujbyshevskoj TEC – 2. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering Journal. 2001, №6. pp. 118 – 124. (in Russian)

3. Zrojchikov N.A., Kudinov B.A., Kovalenko A.G., Kolesnikov S.V., Moskvina A.G., Lisica V.I. Razrabotka kompyuternoj modeli i raschet optimalnyh rezhimov raboty cirkulyacionnoj sistemy TEC – 23 ОАО «Mosenergo». Thermal Engineering. 2007, № 12. pp. 7 – 15. (in Russian)
4. Kudinov I.V., Kolesnikov S.V., Eremin A.V., Branfileva A.N. Kompyuternye modeli slozhnyh mnogokolcevnyh razvetvlyennyh truboprovodnyh sistem. Thermal Engineering №11, 2013. pp. 64 – 69. (in Russian)
5. Sokolov E.YA. Teplofikaciya i teplovye seti. M.: Energoizdat, 1982. 360 p. (in Russian)
6. Kolesnikov S.V., Dikop V.V., Tomkin S.V., Kudinov V.A. Issledovanie gidravlicheskih rezhimov raboty cirkulatsionnoj Tolyattinskoy TEC na kompyuternoj modeli. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i ehnergeticheskikh obedinenij SNG. Energetika. 2002, №6. p. 90. (in Russian)
7. Merenkov A.P., Hasilev V.Y. Teoriya gidravlicheskih cepej. M.: Nauka, 1985. 278 p. (in Russian)
8. Kolesnikov S.V. Issledovanie Tolyattinskih teplovyh setej na kompyuternoj modeli. Journal of Samara State Technical University, Ser. Technical and Mathematical Sciences. 2014, №2 (42). pp. 136 – 147. (in Russian)
9. Merenkov A.P. Differenciaciya metodov rascheta gidravlicheskih setej. Computational Mathematics and Mathematical Physics. 1973. T. 13, №5. p. 1237 – 1248. (in Russian)
10. Dikop V.V., Alfeev A.A., Kudinov V.A., Kudinov A.A., Isaev A.E. Ustrojstvo dlya oborotnogo vodosnabzheniya ehlektrostantsij s gradirnyami. Patent. RUS 2236517.26. 2002. (in Russian)
11. Merenkov A.P. Primenenie EVM dlya optimizacii razvetvlyennyh teplovyh setej. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering Journal. 1963, №4. pp. 531 – 538. (in Russian)
12. Merenkov A.P. i dr. Primenenie teorii i metodov rascheta gidravlicheskih cepej k sistemam s neizotermicheskim techeniem gaza. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering Journal. 1971, №6. pp. 129 – 138. (in Russian)
13. Suharev M.G. Ob odnom metode rascheta gazosbornykh setej na vychislitelnykh mashinakh. Journal «Higher Educational Institutions News. Oil and Gas». 1965, №6. pp. 48 – 52. (in Russian)
14. Kolesnikov S.V., Kudinov I.V., Eremin A.V., Kolesnikova A.S., Branfileva A.N. Issledovanie gidravlicheskih rezhimov raboty cirkulyacionnykh sistem TEC na kompyuternykh modelyakh. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2013, № 7-8. pp. 112-122. (in Russian)
15. Sumarokov S.V. Matematicheskoe modelirovanie sistem vodosnabzheniya. Novosibirsk: Nauka, 1983. 167 p. (in Russian)
16. Sumarokov S.V. Metod resheniya mnogoehkstreimalnoj setевой zadachi. Ekonomika i matematicheskie metody. 1976. T. 12, №5. pp. 1016 – 1018. (in Russian)
17. Zykov A.A. Teoriya konechnykh grafov. M.: Nauka. 1969. 543 p. (in Russian)

Authors of the publication

Eremin Anton Vladimirovich – candidate of technical sciences, assistant professor, Chair of Theoretical Fundamentals of Heat Engineering and Fluid Mechanics (Samara State Technical University). E-mail: a.v.eremin@list.ru. Tel.: 8(917)1110797.

Kolesnikov Sergey Vladimirovich – candidate of technical sciences, Doctoral Candidate, Chair of Theoretical Fundamentals of Heat Engineering and Fluid Mechanics (Samara State Technical University). E-mail: totig@yandex.ru. Tel: 8(846)3324235.

Kudinov Igor Vasilevich – candidate of technical sciences, assistant professor, Chair of Theoretical Fundamentals of Heat Engineering and Fluid Mechanics (Samara State Technical University). E-mail: igor-kudinov@bk.ru. Tel: 8(987)9887778.

Branfileva Anastasiya Nikolaevna – candidate of technical sciences, assistant lecturer, Chair of Theoretical Fundamentals of Heat Engineering and Fluid Mechanics (Samara State Technical University). E-mail: totig@yandex.ru. Tel: 8(987)9023522.

Abisheva Lyubov Sergeevna – candidate of technical sciences, assistant lecturer, Chair of Theoretical Fundamentals of Heat Engineering and Fluid Mechanics (Samara State Technical University). E-mail: totig@yandex.ru. Tel: 8(846)3324235.

Поступила в редакцию

21 мая 2016 г.